

文章编号: 1000-6893(2002) 04-0377-04

用于航空高压直流电源系统的笼型异步 发电机控制策略的研究

黄文新^{1, 2}, 胡育文¹

(1. 南京航空航天大学 航空电源科技重点实验室, 江苏 南京 210016)

(2. 盐城工学院 电气工程系, 江苏 盐城 224003)

RESEARCH OF THE DTC CONTROL STRATEGY FOR INDUCTION GENERATOR USED IN AIRCRAFT HIGH VOLTAGE DC POWER SYSTEM

HUANG Wen-xin^{1,2}, HU Yu-wen¹

(1. Aero-Power SciTech Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. The Department of EE, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224003, China)

摘 要: 现代电力电子技术的发展使得笼型异步发电机能够适用于航空高压直流系统中。着重对笼型异步电机与电力电子变换器结合构成的发电系统进行了研究, 说明了采用直接转矩控制策略可使这种发电系统具有很好的动态特性。介绍了异步发电机直接转矩控制的原理与实现方法, 并给出了仿真与实验结果。

关键词: 异步发电机; 直接转矩控制; 航空; 高压直流

中图分类号: V242.3 文献标识码: A

Abstract: The aircraft high voltage DC (HVDC) power supply system having a starter/generator double function is getting a lot of attention recently. The cage-type induction machine has more advantages such as simplicity, robustness, low cost and easy maintenance. The modern developed power electronic technology makes the cage-type induction generator (CIG) suitable to be used in aircraft HVDC power systems. This paper presents a configuration of the HVDC generation system, which is composed of a CIG and a 3-phase power electronic converter, and makes researches on its control technology. Because the electromagnetic torque is a key physical parameter in the process of converting the mechanical energy into electrical energy in a generator, the direct torque control (DTC) strategy can be applied to the proposed system and makes it have fast dynamic performance. The principle of the DTC strategy for the proposed system is introduced. The elementary simulation and experiment results of this system are also presented.

Key words: induction generator; DTC control strategy; aircraft; high voltage DC power

过去几十年, 航空电源系统经历了从低压直流(24V ~ 28V) 供电系统到交流(115V/400Hz) 供电系统的发展。近年来, 由于机载设备大量增加, 用电量急剧增长, 交流电源系统暴露出配电电缆重、可靠性低、不易做到不间断供电等不足之处。而高压直流电源系统则不存在上述缺点, 将被广泛用作先进战机的电源系统。电力电子技术及其控制技术是支撑高压直流系统的关键技术, 并且使之易于实现起动发电双功能。很显然, 下一代的高性能、大容量的飞机电源系统将是高压直流起动发电双功能电源系统。1997 年, 美国 NASA Lewis 研究中心的专家发表有关飞机起动发电的综述文章^[1]指出, 笼型异步电机及开关磁阻电机

是最有希望适用于飞机新型电源的电机, 特别是笼型异步电机具有结构简单、坚固、价廉、易维护等突出优点, 在现代电力电子装置控制下, 有能够实现高性能高压直流电源系统的潜能, 取代目前采用的旋转整流器式同步发电机。

传统的独立运行的异步发电机采用可调整的外接励磁电容来调压^[2], 近来又发展了采用静止无功补偿装置为异步发电机提供励磁无功电流的技术^[3]。航空电源系统的品质指标要求电源在突加负载时动态恢复时间 < 30ms。采用调节异步发电机的励磁无功的控制方式不易达到这一指标。目前, 高性能的异步电机发电系统采用的控制策略是磁场定向矢量控制方式^[4, 5], 显然这种控制方式具有与异步电动机矢量控制一样的不足, 即参数鲁棒性差、转子磁链不易精确观测、且计算复杂等缺点。本文提出采用直接控制异步发电机的

收稿日期: 2001-09-27; 修订日期: 2001-12-10

基金项目: 航空基础科学基金(98Z52001); 国家自然科学基金

(50177014) 资助项目

文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2002/04/03777>

转矩而控制其瞬时有功的控制方案,可使基于异步发电机高压直流电源系统的性能得到提高且更实用。

1 异步发电机 HVDC 发电系统的控制策略

与笼型异步电机结合构成高压直流发电系统的电力电子装置实际为 IGBT 电压型三相变流器,如图 1 所示。当电能从直流侧经变流器流入异

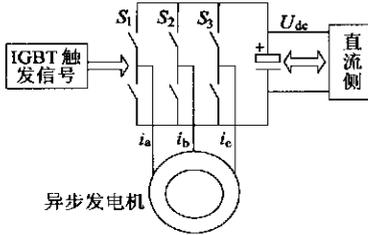


图 1 高压直流异步发电机发电系统示意图

Fig. 1 Configuration of the HVDC generation system

步电机时则是熟悉的电动运行,这里研究的是异步电机发电运行的控制。将变流器同一桥臂的两功率开关等效于为理想的开关,以 S_1, S_2, S_3 表示 3 个开关的状态,其中上管导通时值为“1”,下管导通时值为“0”, S_1, S_2, S_3 有 8 种组合,逆变器输出综合矢量有 8 组,其中 6 组 $V_1(100), V_2(101), V_3(001), V_4(011), V_5(010), V_6(110)$ 为运动矢量,2 组 $V_0(000), V_7(111)$ 为零矢量。

若暂不计发电机与变换器的损耗,则发电机产生的电磁功率与负载消耗的功率应在任何瞬时都平衡,即有下式成立

$$T_e \omega = U_{dc} I_{dc} \quad (1)$$

式中: ω 为电机转速,由原动机决定,它的时间常数比电参数大得多,在分析电磁过程时可视为常量; T_e 为电磁转矩; U_{dc}, I_{dc} 为直流侧电压、电流。由式(1)得

$$\begin{aligned} \frac{dU_{dc}}{dt} &= \frac{\partial U_{dc}}{\partial T_e} \frac{dT_e}{dt} + \frac{\partial U_{dc}}{\partial I_{dc}} \frac{dI_{dc}}{dt} = \\ &= \frac{\omega}{I_{dc}} \frac{dT_e}{dt} - \frac{U_{dc}}{I_{dc}} \frac{dI_{dc}}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

要使 U_{dc} 保持不变,即 $dU_{dc}/dt = 0$, 则要

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{U_{dc}}{\omega} \frac{dI_{dc}}{dt} \quad (3)$$

其物理意义是:电磁转矩是发电机机电能量转换的关键物理量,要获得动态特性好的异步发电系统必须能迅速控制发电机的电磁转矩,使转矩的变化跟上负载电流的变化,以此来稳定输出电压。

系中的空间电压矢量、转矩、磁链关系

$$U_s = r_s i_s + \frac{d}{dt} \Psi_s \quad (4)$$

$$0 = r_r i_r - \frac{d}{dt} \Psi_r + j\omega \Psi_r \quad (5)$$

$$\Psi_r = \Psi_s - L\sigma i_r \quad (6)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{L\sigma} (\Psi_s \times \Psi_r) \cdot \gamma_0 \quad (7)$$

式中: r_s, r_r 为定、转子电阻; $L\sigma$ 为漏感; γ_0 为与坐标轴 α, β 呈右手关系的轴向单位矢量; ω 为电机旋转的角频率; p 为电机的极对数。设定、转子磁链分别为 $\Psi_s = \Psi_s e^{j\theta_s}, \Psi_r = \Psi_r e^{j\theta_r}, \theta_s, \theta_r$ 为磁链与参考坐标轴的夹角,代入式(7),将式(7)微分,得

$$\begin{aligned} \frac{dT_e}{dt} &= \frac{3}{2} \frac{p}{L\sigma} \left[\Psi_s \times \frac{d\Psi_s}{dt} - \dot{\theta}_s |\Psi_s|^2 \gamma_0 + \right. \\ &\quad \left. \dot{\theta}_r \frac{L\sigma}{r_r} (\Psi_s - \Psi_r) \times j\Psi_r \right] \cdot \gamma_0 \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)实际是标量式,进一步化简得

$$\begin{aligned} \frac{dT_e}{dt} &= \frac{3}{2} \frac{p}{L\sigma} \left[\dot{\theta}_s |\Psi_s|^2 - \dot{\theta}_r |\Psi_s|^2 + \right. \\ &\quad \left. \dot{\theta}_r \frac{L\sigma}{r_r} (|\Psi_s|^2 - (\Psi_s \cdot \Psi_r)) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

在某空间电压矢量瞬间作用的 $t=0$ 时刻,转子磁链的转速可认为不变,式(8)、式(9)的第 3 项近似为零,即

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{3}{2} \frac{p}{L\sigma} (\dot{\theta}_s - \dot{\theta}_r) |\Psi_s|^2 \quad (10)$$

根据日本教授山村昌的研究:要使异步电机的动态过程得到改善,在定子磁链、转子磁链和气隙磁链三者之间,至少应保持一个不变。在此选定保持定子磁链 $|\Psi_s|$ 不变。在这前提下,式(9)、式(10)说明:转矩的变化率正比于定、转子磁链的转速差 $(\dot{\theta}_s - \dot{\theta}_r)$,可见,为了迅速改变电磁转矩,应尽可能快地改变定、转子磁链之间的转差角速度。众所周知,在异步电动机的直接转矩控制中,已经解决了如何选择空间电压矢量来快速改变定子磁链旋转速度的问题^[6]。考虑到异步发电机的运行特点,在此也可采用同样的办法,在每一个采样控制周期内,根据定子磁链所在的空间区间 θ ,实际磁链与磁链指令的比较信息 ψ ,实际电磁转矩和电磁转矩指令的比较信息 τ ,按表 1 来选择最优的空间电压矢量,既能保证 $|\Psi_s|$ 基本为常数,又能快速调节电磁转矩。异步发电机的转子转速由原动机决定,采用此控制策略不需要转子转速,仅需定子旋转磁场的转速,用于确定给定磁链的幅值。

在静止坐标系中,可方便地由定子磁链观测器求出定子磁链的转速。

表 1 电机端电压矢量的优选控制表

Table 1 The optimum selection of voltage space vector

ψ	τ	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
-1	1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	0	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7

对异步发电机运用直接转矩控制,所用参数均为电机定子边的量,运算量少,控制实现容易;由于原动机拖动异步发电机发电运行的转速一般是比较高的,在较高转速下运用反电势积分法观测定子磁链可不考虑定子电阻变化的影响。需要指出的是,采用转子磁场定向矢量控制策略实现异步发电机的控制较之复杂得多,除需进行大量的矢量变换运算外,必须获得转子转速,采用速度传感器将增加成本、降低可靠性,而采用无速度传感器将增加成本、降低可靠性,而采用无速度传感器法又受到电机参数特别是转子电阻变化的影响,且增加限 DSP 的计算开销。因此在异步发电机的控制中采用直接转矩控制更有优势。

2 异步发电机高压直流发电系统的实现

基于异步电机的高压直流起动发电系统最终目标是应用于航空,由于尚处于初步研究阶段,首先采用地面电机构造了实验平台,进行了原理性的验证。系统采用快速 DSP(TMS 320C32) 为核心实现电机的控制策略。整个控制系统的框图如图 2 所示。分为转矩控制环与磁链控制环,均采用

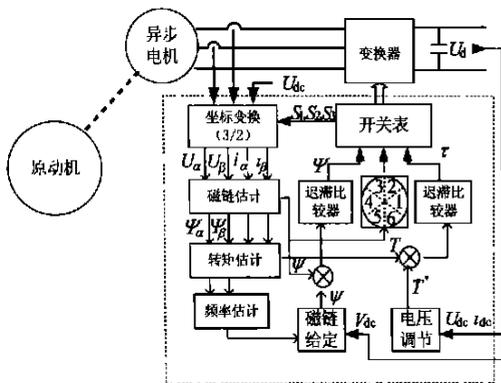


图 2 HVDC 异步发电机直接转矩结构框图

Fig. 2 The block diagram of the DTC strategy applied to the IG generation system

Band-Band 控制。磁链幅值给定应随磁场旋转转速变化而作相应改变。异步发电机的转矩给定由电压调节单元输出,必须指出的是,采用三相 IG

BT 桥式变换器控制的异步发电机起励的必要条件是变换器的直流母线上必须先建有直流电压。对于异步电机启动/发电系统此条件自然满足(因启动时由直流电源供电);对于只作发电运行的系统,可用蓄电池经单向导电的二极管给直流母线建压(如 48V),再让异步发电机在变换器的控制下自励建压。

3 仿真与实验研究结果

采用 MATLAB 对异步发电机直接转矩控制发电系统进行了仿真,仿真参数如下:原动机转速为 200rad/s,输出电压 270V,输出功率 500W。电机参数为 Y90s-4 1.1kW 异步电动机的参数(试验电机)。输出电容为 470μF。仿真了建压过程和突加负载的情况,仿真结果如图 3 所示。图 3 中给出了磁链变化轨迹、相电流、转矩及输出电压响应的仿真结果。在 0.2s 时突加负载,转矩响应为 2ms,突加负载恢复时间为 15ms。

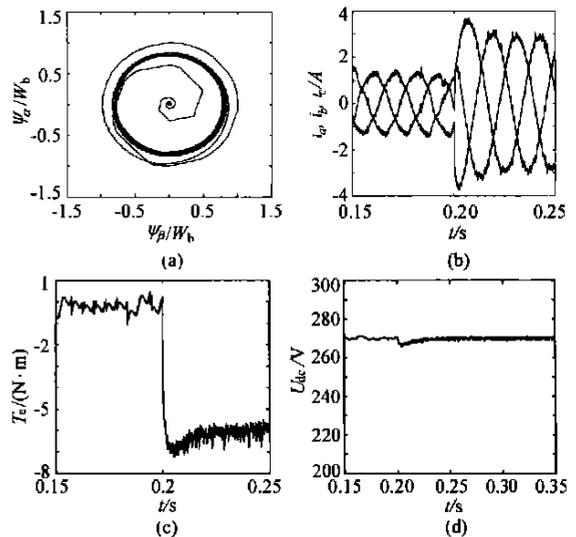


图 3 异步发电机直接转矩控制的仿真结果

Fig. 3 The results of the simulation of the DTC strategy of the IG HVDC generation system

利用实验室一套 1.1kW 异步电机——直流电机机组进行了异步发电机直接转矩控制试验,直流电机作电动运行,拖动异步电机发电。原动机转速小于 1500r/min,采用圆形磁链轨迹直接转矩控制方案。发电前直流母线电压为 100V 由一整流电源经一只二极管提供(二极管起单向导电作用),用于激磁建压,稳定运行输出电压为 270V。实验中记录的相电流波形与突加 500W 负载输出电压波形如图 4 所示,电压超调量小于 10V,恢复时间小于 20ms。

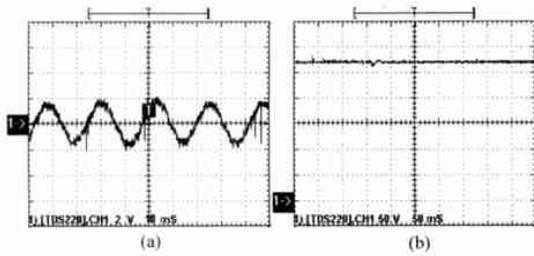


图 4 异步发电机 HVDC 发电系统实验波形

Fig. 4 The phase current wave and the output voltage wave (experimental results)

4 结 论

将笼型异步电机与 IGBT 三相变换器结合构成高压直流发电系统,运用直接转矩控制策略,获得了成功,得到了预期的效果。本文提出的异步发电机直接转矩控制策略和转子磁场定向控制相比,没有 PWM 电流环,直接控制 6 个开关管的开通,具有快速响应的能力;受电机参数的影响小,鲁棒性好;不必获知转子转速,因而不需转速传感器;控制算法计算简单,实现容易。本文研究的变换器控制的笼型异步发电机发电系统不仅可用于构成飞机的高压直流起动发电双功能电源系统,也可应用于风力发电、机电储能、混合动力汽车等民用场合。简单可靠而又高性能将使其具有较强的竞争性与经济意义。

参 考 文 献

[1] Elbaluk M E, Kankam M D. Potential starter/generator

technologies for future aerospace application [J]. IEEE AES System Magazine, 1997, 21(5): 24- 31.

[2] Marra E G, Pomillio J A. Induction generator based system providing regulated with constant frequency [A]. APEC'99 [C]. 1999. 410- 415.

[3] Shilpaker S. Analysis of solid state voltage regulator for a self-excited induction generator [J]. Proc-Gener Transm Distrib, 1998, 145(6): 647- 655.

[4] Liao Y W, Levi E. Modelling and simulation of a stand-alone induction generator with rotor flux oriented control [J]. Electric Power Systems Research, 1998, 46(2): 141 - 152.

[5] Alan R, Lipo T A. Control of a polyphase induction generator/induction motor power conversion system completely isolated from the utility [J]. IEEE Trans on Industry Application, 1994, 30(3): 636- 647.

[6] Takshashi I, et al. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor [J]. IEEE Trans on Ind Application, 1986, 22(5): 820- 827.

作者简介:



黄文新(1966-) 江苏建湖人,1988 年毕业于东南大学电子工程系,盐城工学院副教授,现为南京航空航天大学在读博士,研究方向为电机控制。

胡育文(1944-) 江西樟树人,教授,博士生导师,南京航空航天大学航空电源科技部重点实验室副主任。研究方向为电力电子技术及运动控制。

(责任编辑:俞 敏)